異種油輸送パイプラインにおける コンタミネーション

—昭和44年9月25日受理—

日本国有鉄道技術研究所 今 西 良 一

1. ま え が き

わが国における最近の石油需要の伸びはきわめていちじるしく、昭和43年度燃料油需要は約1億2,400万klと米国、ソ連につぐ石油消費国となり、その伸び率は過去10年間平均で19%と、世界の驚異といわれた国民実質総生産の伸びをはるかに上まわり、今後ますます増大するものと思われる。一方石油製品の輸送は船舶(64.8%)、鉄道(8.2%)、自動車(27%)などによって行なわれているが、最近における交通ラッシュは港湾、道路、線路を問わず年とともににはなはだしくなり、乗務員などの人件費の増大とともに製品輸送コスト上昇の原因となつている。また石油製品は可燃性物質であり、消防法を始めとする法律などの規制を受けとくに人口稠密地帯の輸送については安全の面からも配慮が必要である。一般に流体の輸送手段として大量の場合、地中パイプラインが安全かつ有利であることは水道、ガスから考えて容易に想像できることであるが、石油においても例外ではなく、欧米ではすでに普及されており、とくにアメリカにおいては原油の80%、石油製品の20%がパイプラインによって輸送されている。しかしわが国においては、

- ① 原油のほとんどが輸入され、したがって精油所が海岸に接しており長距離原油パイプラインの必要性が少ない。
- ② わが国の国土は細長い島国であり、欧米にくらべ、タンカーによる輸送が発達しており、これが長距離パイプラインの役をなしている。
- ③ 重油のシェアが大きく、その場合のパイプラインは加熱保温のためコスト高になる。
- ④ わが国は土地関係が錯綜しておりまた人口稠密であることから土地の確保が困難である。
- ⑤ わが国石油業界におけるシェア競争が激しく製品規格も統一されていない。

などの理由で一部コンビナート内の輸送、石油生産地の小規模なものを除いて石油輸送にパイプラインは使用されていない。しかしこれらの事情下において上述

の需要の異常な伸び、交通の輻輳化、人件費の高騰によりパイプラインの有利性は年々高まりつつあり、輸送業としてパイプラインの実現する時期は近いものと思われる。その場合やはり製品パイプラインで、その距離は100km~300kmの規模と思われる。この距離を高級ガソリン、普通ガソリン、灯油、軽油、重油と別々のパイプを敷設して油を送つたのでは経済性にあつた需要がなくなり、また需要があつたとしても径を太くして一本のパイプで送つた方が有利である。これは輸送量が直径の2乗に比例するのに対し建設費が直径の1乗に比例すること、また径が大きくなれば単位当たりの動力費が減少することから容易に理解することができよう。したがって一本のパイプで多種多銘柄の石油製品を送らなければならない。その場合境界面にどうしてもコンタミ(コンタミネーションの略)と称する混合物ができる。それをできるだけ少なくするため乱流方式、スフィアなどの物体を境界面にそう入して輸送する方式があるが、それぞれについてコンタミの要因および量について述べてみたい。

2. コンタミの要因

パイプラインにおいて石油製品が発基地、または製油所のタンクから図1のごとく、バルブ、分岐管、主ポンプ、輸送管などをとおつて、着基地のそれぞれのタンクに送られるまで、種々のコンタミの要因が考えられる。発基地のポンプの吐出口までにおけるコンタミ

図1 パイプラインにおけるコンタミの分類

ミ (初期コンタミと称す) と、発基地ポンプの吐出口から着基地までにおこる輸送管中のコンタミと着基地において境界面の検知、分配バルブの操作のためにおこる着基地におけるコンタミと三つに分けて考えてみよう。

2-1 初期コンタミ

初期コンタミとして考えられる要因はつぎのとおりである。

(1) ポンプによるもの

境界面がポンプ内を通過する際、コンタミを増す原因となる。

(2) 切替えバルブの作動時間によるもの

ポンプ運転中油を切替える場合、瞬時に行なえば、理論的にコンタミは 0 であるが、それは物理的に不可能である。したがって切替弁の作動時間によるコンタミが存在する。

(3) 空気抜き、ろ過器、計器などによるもの

発基地には空気抜き、ろ過器、流量計などがパイプラインに設備してある。これらの付属機器を境界面が通過する際、(1)同様コンタミの原因になる。

2-2 輸送管中のコンタミ

発基地の主ポンプの吐出口から着基地まで一本のパイプで異種の油を送る場合、その境界面にコンタミが考えられる。

(1) 乱流方式の場合

パイプの中を乱流の領域速度で油を送ると管の断面における速度分布は層流の場合と違い割合に一樣となり、また半径方向の流れも生ずることにより境界は層流の場合にくらべ一様に移動する。しかし境界面の拡散によるコンタミが生じ、その量は平均速度、流体の粘度、密度などによるレイノルズ数に関係する。

(2) スフィアをそう入する方式

パイプの内径より大きい直径のスフィアを使用してもスフィアを移動させるためパイプの内壁との間にうすい膜が必要であり、したがってわずかの油が洩れコンタミの原因となる。

2-3 着基地におけるコンタミ

石油製品間の混合には絶対に許されないものがある。たとえば、灯油中にガソリンの混入は禁止されている。したがって灯油-ガソリン間の着基地における切替えは灯油側で行なう。この際境界面検知の正確さが期待できない時は安全を考慮して若干灯油側すなわち図 2 において AA' 断面で行なわないで BB' 断面で行なう。そのためコンタミ量 $\frac{\pi}{4} D^2 l$ が増加する。また分配弁の切替時間、計器など各種付属機器もコン

図 2 ガソリン-灯油間の切替え

タミの原因になることは発基地の場合と同様である。

3. 乱流方式における輸送管中のコンタミ量

乱流方式で異種油 (A 油と B 油) を送った場合、その境界面の中央は A 油 50%, B 油 50% であり、それより A 油側にくるにしたい A 油の混合率が多く、やがて A 油 100% となる。B 油側はその逆である。A 油が 10% から 90% までの長さを Y_{10-90} m とし、A 油が 5% から 95% までの長さを Y_{5-95} m とし、おおよそのパーセントのコンタミ長さと呼称する。図 3 において、ステーション 0 で、A 油の後に直ちに B 油を送った場合、Y はステーション 2, 3 と進むにつれ、長くなつてゆくのはもちろんである。

図 3 拡散によるコンタミ長さの考え方

これは前節で述べたとおり、主として拡散によつて行なわれるのでフィックの法則にしたがうものとする。とつぎの微分方程式が成立する。

$$\frac{dC}{dt} = D \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) C$$

C : B 油中 A 油のコンタミ量

D : 軸方向の拡散係数

t : 時間 (sec)

v : 速度 (m/sec)

L : パイプの長さ (m)

x 軸をパイプの軸方向とすれば、一定速度 v で油が送られている時、t 秒後、すなわち L m 境界面が移動した時、x 軸方向の C の分布を算出することにより、C が 5% から 95% のところまでの距離 Y_{5-95}

を求めることができる。

Octave Levenspiel¹⁾ によれば、上述の式を解くことにより $\frac{Y}{L}$ と $\frac{D}{vd}$ との関係求め、さらに $\frac{D}{vd}$ とレイノルズ数との間に図 4 のごとき関係があることから、パイプの径、油の速度、動粘度が既知であれば、コンタミ長さや輸送距離との関係を求めることができる。

図 4 レイノルズ No. と分散係数 D/vd との関係 (ただし乱流領域)

敷設されるパイプを 12" と想定し、速度 1 m/sec の場合ガソリンと灯油の境界面のコンタミ長さが 0 km から 100 km の間でどのように変化するかを図示したものが図 5 である。なお、よく用いられる E.A. Birge²⁾ のコンタミの近似式 $Y = 1.93 L^{0.529}$ (ただし単位 Feet) を同図にプロットすると点線のとおりとなる。

速度、粘度、直径が変わるとレイノルズ数が変わ

図 5 輸送距離 100 km までのコンタミ長さの変化

り、コンタミ長さも変わってくる。しかし、ある数値以上ではコンタミ長さは一定である。その関係を図示したのが図 6 である。

図 6 パイプの直径、動粘度とコンタミ長さ、速度との関係

4. スフィアなどを使用した場合

異種油を一本のパイプで送油するのに油の境界面に図 7 のような球 (スフィア) をそう入し、油を分離したまま送油する方法がある。スフィアは中空で壁は厚く、中に水 (32°F ~ 150°F)、グリセリン (150°F 以上の場合)、水とエチレングリコール (32°F ~ -20°F)

が充てんしてあり、パイプの内径より若干大きめの直径になるまで圧入する。スフィアの材質はネオプレン、ハイカー、ハイガス、ポリウレタンなどで作られ、適当な弾性を持ち、パイプの中の真円でない箇所をも容易に通り返れることができ、またこの弾性のため球の中の液体の圧力は何時でもパイプの壁の間をシールしている。球の他に茶わん型や円板型のものもある。

スフィアを使用した場合の分離能力については、M. L. Barrett³⁾ の論文がある。それによればパイプの内径より

図 7 スフィア方式

約 1% 大きい直径のスフィアを使用した場合が最も効果的で、それ以上スフィアの直径を大きくしても抵抗が増えるだけで意味がない。その場合先行の油が後方に洩れる量は移動した総量の 0.02~0.04% である。

この考え方を基礎にして洩れ量とスフィアの数、スフィア間の間隔との関係を考えてみるとつぎのとおりである。

4-1 スフィア 1 箇の場合

後続油 B に先行油 A の混じる量 x (kl) は次式で表わされる。

$$x = r \frac{\pi D^2 S}{4} \quad (1)$$

r : 洩れ率

D : パイプ内径 (m)

S : 輸送距離 (m)

4-2 スフィア 2 箇の場合

図 8 において第 2 スフィアを越えて洩れる先行油 A の量を y kl とすると、 B_1 の内容積 V (kl) はつぎの式で表わされる。

$$V = \frac{\pi D^2 L}{4} \quad (2)$$

L : スフィア間の距離 (m)

図 8 スフィア 2 箇の場合

スフィアが S だけ移動した後の B_1 の A 油の平均濃度は $\frac{x-y}{V}$ である。

S が大きくなると B_1 の A 油の濃度は平均化されるのでつぎの式が成立する。

$$\frac{dy}{dS} = \frac{x-y}{V} r \frac{\pi D^2}{4} = \frac{r}{L} (x-y) \quad (3)$$

$$\frac{r}{L} = \beta \text{ とおき} \quad (4)$$

(3) に (1) (4) 式を代入して

$$\frac{dy}{dS} = \beta \left(\frac{r \pi D^2}{4} S - y \right) = \frac{r^2 \pi D^2}{4L} S - y \quad (5)$$

$$\frac{r^2 \pi D^2}{4L} = \alpha \text{ とおくと}$$

$$\frac{dy}{dS} = \alpha S - \beta y$$

図 9 スフィアを使用した場合 Flow back する油の量 (kl)

$$\text{一般解 } y = \frac{\alpha}{\beta} \left(S + K e^{-\beta S} - \frac{1}{\beta} \right)$$

$$\text{初期条件 } S=0, y=0 \text{ から } K = \frac{1}{\beta}$$

$$y = \frac{\alpha}{\beta} \left(S + \frac{1}{\beta} e^{-\beta S} - \frac{1}{\beta} \right) \quad (6)$$

となる。

$r=0.0004$ とし、 $D=12''$, $L=5$ m, 10 m, 20 m, 30 m, 40 m の場合の y と S との関係は図 9 のとおりである。

4-3 スフィアが 3 箇の場合

図 10 において

図 10 スフィア 3 箇の場合

$B_1 \rightarrow B_2$ に洩れる A 油の量を y kl

$B_2 \rightarrow B_0$ に洩れる A 油の量を z kl とすると

B_2 の A 油の濃度 $= \frac{y-z}{V}$ となり、

4-2 と同じ考え方で

$$\frac{dz}{dS} = \frac{y-z}{V} r \frac{\pi D^2}{4} = \beta (y-z) \text{ となる。}$$

これに (6) を代入して

$$\frac{dz}{dS} = \alpha S + \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta S} - \frac{\alpha}{\beta} - \beta z$$

$z = A e^{-\beta S}$ とおくと

$$\frac{dz}{dS} = \frac{dA}{dS} e^{-\beta S} - \beta z$$

上の 2 式から $\frac{dA}{dS}e^{-\beta s} = \alpha S + \frac{\alpha}{\beta}e^{-\beta s} - \frac{\alpha}{\beta}$

$$\frac{dA}{ds} = \alpha S e^{\beta s} + \frac{\alpha}{\beta} - \frac{\alpha}{\beta} e^{\beta s}$$

S で積分して

$$A = \alpha \frac{e^{\beta s}}{\beta} \left(S - \frac{1}{\beta} \right) - \frac{\alpha}{\beta^2} e^{-\beta s} + \frac{\alpha}{\beta} S + K$$

$$z = \frac{\alpha}{\beta} \left(S - \frac{1}{\beta} \right) - \frac{\alpha}{\beta^2} + \frac{\alpha}{\beta} S e^{-\beta s} + K e^{-\beta s}$$

$$S=0 \text{ のとき, } z=0, K = \frac{z\alpha}{\beta^2}$$

$$z = \frac{\alpha}{\beta} S (1 + e^{-\beta s}) - \frac{z\alpha}{\beta^2} (1 - e^{-\beta s}) \text{ となる。}$$

4-2 と同じく $D=12''$ $\gamma=0.4 \times 10^{-3}$ の場合 $L=5\text{m}$, 10m , 20m , 30m , 40m のとき y と S との関係は図 11 のとおりである。

図 11 スフィア 3 個使用した場合 Flow back する油の量 (kl)

4-4 スフィアが 4 箇, 5 箇の場合

今までと同様の考え方でスフィアが 4 箇, 5 箇になった場合, 最終スフィアを越えて洩れる A 油の量を w , u kl とするとつぎの式が導かれる。

$$w = \frac{\alpha}{2} S^2 e^{-\beta s} + \frac{\alpha}{\beta} S (1 + 2e^{-\beta s}) - \frac{3\alpha}{\beta^2} (1 - e^{-\beta s})$$

$$u = \frac{\alpha\beta}{6} S^3 e^{-\beta s} + \alpha S^2 e^{-\beta s} + \frac{\alpha}{\beta} S (1 + 3e^{-\beta s})$$

$$- \frac{4\alpha}{\beta^2} (1 - e^{-\beta s})$$

5. 発基地ですでにコンタミのある場合の考察

2 箇ですでに述べたとおりコンタミの原因には発基地の分岐バルブ, ポンプ, 空気抜きなどの機器に先行の油が残り, 続行の油に混入することが考えられる。この場合を考えてみよう。

図 12 初期コンタミ Y_0 がある場合

5-1 乱流方式の場合

発基地における 99~1% のコンタミ長さを Y_0 m とし, S km 移動した後のコンタミ長さを Y_s m とする。図 5 において 99~1% のコンタミが Y_0 のときの仮想距離を S_0 とすると, S km 移動した時の Y_s は $(S+S_0)$ の時のコンタミ長さに相当する。たとえば図

5 の時の条件 ($D=12''$ $v=1.0\text{m/sec}$, 平均 $\nu=3\text{cSt}$, $Re=100,000$) で $Y_0=80\text{m}$ あるとすると, $S_0=2\text{km}$, $S=40\text{km}$ の時のコンタミ長さ Y_s は $40+2=42\text{km}$ のときのコンタミ長さ 380m となる。初期コンタミを 0 としたときの長さ 372m とくらべるとあまり変わらない。つまり乱流の場合は初期コンタミは輸送距離が長くなるにつれ影響が少なくなる。

5-2 スフィア 2 箇の場合

図 13 において

x : S m 移動した後, スフィア I をこえて洩れる A 油の量 (kl)

y : S m 移動した後スフィア II から洩れる A 油の量 (kl)

L : スフィア間の距離 (m)

D : パイプ内径 (m)

ρ_1 : $S=0$ m の時既にスフィア I, II 間に混入している A 油の量 (kl)

V : スフィア I, II 間の内容積 $\frac{\pi}{4} D^2 L$ kl

とすると, S m 移動したスフィア I, II 間に混入している A 油の量は $x-y+\rho_1$ となり, A 油の混合濃度

図 13 スフィア 2 箇初期コンタミがある場合

$= \frac{x-y+\rho_1}{V}$ となる。

L が大きくない時、混合部は直ちにスフィア I, II 間に均等に拡散するものと仮定するとつぎの式がなりたつ。

γ, β, α は 4-1 と同じ

$$\frac{dy}{dS} = \frac{x-y+\rho_1}{V} \gamma \frac{\pi D^2}{4} = \beta(x-y+\rho_1)$$

$$\frac{dy}{dS} = \beta x + \beta \rho_1 - \beta y$$

$y = Ae^{-\beta S}$ とおくと

$$\frac{dy}{dS} = \frac{dA}{dS} e^{-\beta S} - \beta y$$

上の 2 式から $\frac{dA}{dS} e^{-\beta S} = \beta x + \beta \rho_1$ となり、

$x = \gamma \frac{\pi D^2}{4} S$, (5) を代入して

$$\frac{dA}{dS} = \alpha S \beta e^{\beta S} + \beta \rho_1 e^{\beta S}$$

S で積分して

$$A = \frac{\alpha}{\beta} e^{\beta S} \left(S - \frac{1}{\beta} \right) + \rho_1 e^{\beta S} + K \quad K = \text{積分定数}$$

$$y = \frac{\alpha}{\beta} \left(S - \frac{1}{\beta} \right) + \rho_1 + K e^{-\beta S}$$

$S = 0$ のとき $y = 0$, $K = \frac{\alpha}{\beta^2} - \rho_1$

$$y = \frac{\alpha}{\beta} \left(S + \frac{1}{\beta} e^{-\beta S} - \frac{1}{\beta} \right) + \rho_1 (1 - e^{-\beta S}) \quad (7)$$

$\rho_1 = 0$ のとき $y = \frac{1}{\beta} \left(S + \frac{1}{\beta} e^{-\beta S} - \frac{1}{\beta} \right)$ となる。

これは (6) 式スフィア 2 箇で初期コンタミが 0 のときと全く同じである。

図 14 スフィア 2 箇初期コンタミのある場合 ($L=40$ m)

スフィア I, II 間が A 油で充満しているときは

$$\frac{\rho_1}{V} = 1, \quad \rho_1 = \frac{\pi}{4} D^2 L$$

$$(4) (5) \text{ 式から } \frac{\alpha}{\beta^2} = \frac{\gamma^2 \pi D^2}{4L} \times \frac{L^2}{\gamma^2} = \frac{\pi}{4} D^2 L = \rho_1$$

これを (7) 式に代入して $y = \frac{\alpha}{\beta} S = \gamma \frac{\pi D^2}{4} S$

これは (1) 式スフィア 1 箇の場合と同じである。

B 油が A 油に混合することを嫌う場合を想定し、混合部より 1 m A 油側に第 1 のスフィアをそう入し、 L m 離して第 2 のスフィアをそう入した場合、初期コンタミ長さ 19 m, 29 m, 39 m のときの y と S の関係を計算したのが図 14 である。乱流方式の場合とは違って、初期コンタミの影響が非常にあることがわかる。

5-3 スフィア 3 箇の場合

図 15 において

スフィア I, II 間に既に混入している A 油の量を

を ρ_1 kl

スフィア II, III 間に既に混入している A 油の量を

を ρ_2 kl

スフィア I をこえて洩れる A 油量を x kl

スフィア II をこえて洩れる A 油量を y kl

スフィア III をこえて洩れる A 油量を z kl

図 15 スフィア 3 箇初期コンタミのある場合

とすると、5-2 と同じ考え方から

$$\frac{dz}{dS} = \beta(y-z+\rho_2)$$

となり、これに (7) 式

$$y = \frac{\alpha}{\beta} \left(S + \frac{1}{\beta} e^{-\beta S} - \frac{1}{\beta} \right) + \rho_1 (1 - e^{-\beta S})$$

を代入して S で積分すればつぎのとおりとなる。

$$z = \frac{\alpha}{\beta} S (1 + e^{-\beta S}) - \frac{2\alpha}{\beta^2} (1 - e^{-\beta S}) + \rho_1 (1 - e^{-\beta S} - \beta S e^{-\beta S}) + \rho_2 (1 - e^{-\beta S}) \quad (8)$$

6. 異種油が順次送られるパイプライン中の コンタミ量

一本のパイプで種類の異なつた石油製品を送る場合、混合をできるだけ少なくし、また混合した場合の影響を最小限に止めるため輸送の順序も互に似かよつた油が隣り合せるよう計画する。たとえば重油、ジェット燃料を除いた輸送パイプの送油順序は図 16 のようになる。

石油製品間の許される混合割合は石油各社によって異なると思われるが某社の資料によるとつぎのとおりである。

図 16 白系統送油順序ただしジェット燃料を除く

灯油中ガソリン	Nil
灯油中軽油	0.05%
普通ガソリン中灯油	0.5%
普通ガソリン中軽油	0.3%
軽油中ガソリン	Nil
軽油中灯油	0.5%

図 16 の順序で送られる高級ガソリンの量は少ないのでつぎの順序が考えられる。

灯油-ガソリン-灯油

この場合、灯油にガソリンが混入することが禁ぜられているので境界面は常に灯油側でカットするが、その場合どのくらい灯油がガソリン中に混合するかが問題となる。 $S=50\text{ km}$ として計算してみよう。

6-1 初期コンタミがないと仮定した場合

6-1-1 乱流方式の場合

パイプの内径 12", 流速 1 m/sec の場合、図 5 より

$S=50\text{ km}$ のとき

$$Y_{99-1}=410\text{ m}$$

ガソリン 1%, 灯油 99% のときカットするとすればガソリンの中に混入する灯油の量はつぎのとおりとなる。

$$410\text{ [m]} \times \frac{\pi}{4} D^2 \times \frac{1}{2} \times 2 = 28.89\text{ [kl]}$$

(両側を考え 2 倍した)

6-1-2 スフィア方式の場合

スフィア方式の場合、洩れは 4 で述べたとおり先行の油が続行の油中に洩れるので、スフィア I は常に境界面にそう入され、II, III は $L\text{ m}$ 離れて続行油中に

図 17 燈油-ガソリン-燈油の送油パイプ中の
コンタミ

そう入される。輸送後カットされる面は先行油が灯油の場合スフィア I の面であり先行油がガソリンの場合は最後のスフィアがカットの境界面になる。

図 17 の場合

(1) A 境界面におけるコンタミ量

灯油中ガソリン 0

ガソリン中灯油 1.413 kl (図 9 参照)

A 境界面でカットする所は常に一番目のスフィアであるから、このスフィアを越える灯油の量がすべてガソリン中に混入されるので、これはスフィアの数と関係がない。

(2) B 境界におけるコンタミ量

◎ 灯油中ガソリンの混合

4-2, 4-3 における y, z から求めることができその値は表 1 のとおりである。

表 1 ガソリン-灯油-ガソリン-灯油のコンタミ
量 (初期コンタミ=0 の場合)

$S=50\text{ km}$ (位単 kl)

乱	スフィアの数	ガソリン→灯油 灯油→ガソリン	
		0.062	28.89
2	10	0.8	1.506
	20	0.52	1.933
	30	0.38	2.499
	40	0.30	3.126
3	10	0.375	1.788
	20	0.146	2.972
	30	0.085	4.324
	40	0.046	5.698

◎ ガソリン中灯油の混合

B 境界面でカットする場合は最後のスフィアの面

であるから、スフィア間の内容積 $V = \frac{\pi}{4} D^2 L$ とすれば

スフィア 2 箇の場合 $V - (x - y)$

スフィア 3 箇の場合 $2V - (x - z)$

以上まとめて乱流、スフィア方式を比較したものが表 1 である。

6-2 初期コンタミのある場合

発基地でどのくらいのコンタミがあるか、Gathering システムをどうするかはポンプその他の付属機器によって違い不明であるが、コンタミ長さ Y_{1-99} が 20 m, 40 m, 60 m と仮定して 6-1 と全く同じ条件で計算してみた。

6-2-1 乱流の場合

Y_0	$Y_s (S=50 \text{ km})$
20 m	411 m
40 m	413 m
60 m	415 m
0 m	410 m

初期コンタミが 20 m~60 m あつても輸送距離が 50 km 以上あると終端のコンタミ量にはほとんど影響しない。

6-2-2 スフィア方式の場合

灯油-ガソリン-灯油の順序で石油製品が送られた場合、ガソリンのあとに送られる灯油に混合するガソリンのコンタミ量が問題であり少なくとも最後のスフィアまでの距離は 80 m (スフィアの数 3 箇 $L=40 \text{ m}$) 必要と思われる。その場合の計算値は表 2 のとおりである。

表 2 ガソリン-灯油-ガソリン-灯油のコンタミ量

初期コンタミ長さ	$\rho_1 (\text{kl})$	$\rho_2 (\text{kl})$	スフィア 3 箇 ($L=40 \text{ m}$) 初期コンタミのある場合	
			$S=50 \text{ km}$	
			ガソリン → 灯油	灯油 → ガソリン
29 m	0.7065	0	0.109	5.761
40 m	1.413	0	0.173	5.825
60 m	1.884	0.2355	0.3086	5.960
0 m	0	0	0.046	5.698

6-2-3 スフィアの数を増した場合の減衰率

初期コンタミを第 1 スフィアと第 2 スフィアの間に収めスフィアの数を増した場合最終スフィアをこえて洩れる量への影響を調べてみよう。

初期コンタミのない場合の洩れ量を y_0, z_0, w_0, u_0 とし、初期コンタミのある場合の洩れ量を y, z, w, u とする。初期コンタミを ρ_1 とし、スフィアによる減衰係数を $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ とする。

スフィアの数 2 箇の場合

$$y = y_0 + \rho_1 \eta_1 \quad \eta_1 = 1 - e^{-\beta s}$$

スフィアの数 3 箇の場合

$$z = z_0 + \rho_1 \eta_2 \quad \eta_2 = 1 - e^{-\beta s} - \beta S e^{-\beta s}$$

スフィアの数 4 箇の場合

$$w = w_0 + \rho_1 \eta_3$$

$$\eta_3 = 1 - e^{-\beta s} - \beta S e^{-\beta s} - \frac{\beta^2 S^2}{2} e^{-\beta s}$$

スフィアの数 5 箇の場合

$$\mu = u_0 + \rho_1 \eta_4$$

$$\eta_4 = 1 - e^{-\beta s} - \beta S e^{-\beta s} - \frac{\beta^2 S^2}{2} e^{-\beta s} - \frac{\beta^3 S^3}{6} e^{-\beta s}$$

$\gamma = 0.4 \times 10^{-3}$ $L=40 \text{ m}$ の $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \eta_4$ の S との関係に図 18 のとおりである。

図 18 スフィアによる減衰と距離との関係

7. 洩れ率 γ の影響

スフィアを使用した場合、先行の油が後方に洩れる量は移動した総量の 0.02~0.04% であることはすでに 4 節で述べ、4~6 の計算は洩れ率 $\gamma = 0.4 \times 10^{-3}$ で計算した。これはパイプの形状、曲り管、溶接部内面の仕上状態、スフィアの疵などによって影響される。

スフィア 1 箇の場合は (1) 式のとおり洩れ量は γ に直線的に比例するがスフィアの数が増えると直線的ではない。

$D=12''$, スフィアの数 3 箇, $L=40\text{m}$, $S=80\text{km}$
 Z : 初期コンタミ長さ 20m の場合, Z_0 : 初期コンタミのない場合

図 19 洩れ率 γ の影響

スフィア数 3 箇, $L=40\text{m}$, 初期コンタミ長さ 20m
 $S=80\text{km}$, パイプ内径 $12''$ の場合の γ と z の関係を
 図示したのが図 19 である。ただし,

z_0 : 初期コンタミが 0 の場合の混合量

z : 初期コンタミ長さ 20m の時の混合量

これをみても γ の影響が非常に大きいことがわかる。したがって, γ に影響すると思われるパイプの曲り管, 溶接部内面はできるだけ真円で凹凸のないものを用いなければならない。

8. む す び

乱流方式とスフィア方式と比較すると, スフィア方式の方がコンタミ量が少ないのは当然であるが, スフィア方式の場合, 先行油が続行油に混合するいわゆる “Flow Back” なので, 先行油がガソリン, 続行油がその混合を極度に嫌う灯油, 軽油の場合, ピグ 2 箇では不充分であり 3 箇以上必要である。また先行油が灯油, 続行油がガソリンの場合 “Flow Back” の考え方から灯油にガソリンの混入のおそれがなく, 第 1 スフィアをカットの境界面とした時, 第 2, 第 3 のスフィアは無意味になる。しかしこれは初期コンタミのない場合で, ある場合は 2 箇必要となるであろう。スフィア間の距離は長いほど効果があるが, スフィア間の部分はコンタミとして処理されるのであまり長いとかえつてコンタミ量を増す結果となる。同じ距離間でスフィアの数を増した場合, コンタミ量を減らすことができるが, スフィアのそう入, 取出しは運転中に行なわれるので物理的限度がある。初期コンタミの影響は乱流の場合あまり影響しないが, スフィアの場合影響が大きい。また距離が数百 km 以上になると乱流の増え方は少なくなるが, スフィアの場合はだんだん増加する傾向なので長距離の場合, 乱流の方が有利であると思われる。またスフィアは時として関係位置を乱す場合があり, スフィアを用いても何らかの方法で境界面の検知が必要である。乱流の場合, スフィアを用いる場合の双方とも, パイプの曲り, 内面仕上り, 真円度がコンタミ増加の原因となるから配管の設計施行には充分な注意が必要である。

文 献

- 1) Octave Levenspiel “How much mixing occurs in a pipe” Petroleum Refiner, March 1958
- 2) E. A. Birge “Contamination Control in Product pipe line”
- 3) M. L. Barrett “Using Expandable Spheroids For Batch Separation”, June 1959 Pipe Line Industry

Contamination in a Petroleum Product Pipe Line

by Ryoichi Imanishi

(Railway Technical Research Institute)

STNOPSIS: — When many kinds of petroleum products of various companies are

sent serially through a pipe, the most serious problem is contamination.

In order to reduce the amount of contamination two methods are used ; one is a turbulent flow, the other is to use a mechanical separator like a sphere.

Where the method of "a turbulent flow" is used contamination is caused by axial mixing which may be considered as a diffusion mechanism governed by Fick's Law. On the other hand, where the method of "using a sphere" is used, contamination is caused by the "flow back" across a sphere.

The amount of the "flow back" must be about 0.02~0.04 percent of the total volume displaced.

According to the above assumption, this report presents the amount of contamination which is expected to occur in real pipelines, comparison of the two methods, the relation between the final amount of contamination and the number of spheres, their spacing and initial contamination which has occurred at a starting station.